KAPITEL 2
QUARKS, STRINGS UND SUPERSTRINGS

2.1 Das Atom

Der Begriff „Atom“ ist uns so vertraut, dass es überrascht, dass viele führende Physiker und Chemiker noch um 1900 nicht an die Existenz von Atomen glaubten.
Einflussreiche Positivisten wie der deutsche Physiker Ernst Mach, dessen Philosophie damals Einfluss auf die Entwicklung der speziellen Relativitätstheorie des jungen Einstein hatte, glaubten nicht an Atome, weil sie nicht beobachtet worden waren. Heute können Rastertransmissionselektronenmikroskope Fotos von einzelnen Atomen aufnehmen. Aber zu Beginn dieses Jahrhunderts waren Atome noch nicht „entdeckt” worden, im Sinne dessen, dass in den letzten dreißig Jahren Hunderte von subatomaren Teilchen mit Hilfe von Hochenergie-Teilchenbeschleunigern gefunden wurden. Tatsächlich wurden Atome in diesem Sinne nie direkt nachgewiesen. Ihre Existenz wurde durch die Entdeckung ihrer Bestandteile offenbart.

Die Theorie, dass Materie aus bestimmten Elementarteilchen besteht, wird oft dem griechischen Philosophen Demokrit (ca. 460–370 v. Chr.) zugeschrieben. Dabei war er tatsächlich der große antike Verfechter der Atomtheorie, die ursprünglich von seinem Lehrer Leukipp als Lösung für das von dem Dialektiker Zeno aufgeworfene Problem der Unmöglichkeit der Bewegung aufgestellt worden war. Zeno hatte argumentiert, dass der griechische Held Achilles eine Schildkröte nicht einholen könne, da er zunächst den Ort erreichen müsse, an dem die Schildkröte gestartet sei. Bis dahin hätte sich die Schildkröte jedoch bereits ein Stück weiterbewegt, sodass Achilles diese Distanz zurücklegen müsste, bis sich die Schildkröte wiederum weiterbewegt hätte und so weiter, sodass Achilles immer hinterher bliebe. Leukipp war der Ansicht, dass man, um der Unmöglichkeit von Zenos Schlussfolgerung zu entgehen, die in seiner Argumentation implizierte unendliche Teilbarkeit der Entfernung leugnen müsse. Die Festlegung einer Grenze für die räumliche Teilbarkeit führte zum Konzept der Atome oder „atomos“, der physikalisch „Unteilbaren“. Überraschenderweise blieb „Zenos Paradoxon“, wie Mathematiker und Philosophen dieses Problem nannten, logisch gesehen ungelöst, bis der Mathematiker Edward Nelson von der Princeton Universität 1977 seine „Interne Mengenlehre (Internal Set Theory, IST)“ vorschlug, die eine geeignete Definition für mathematische Größen namens „Infinitesimale“ (die jedem bekannt sind, der Differentialrechnung studiert hat) lieferte und somit eine logische Lösung für Zenos Paradoxon ermöglichte. Dieses Problem führte nicht nur zur Entstehung des Glaubens an Atome, sondern offenbarte den alten Griechen auch die Komplexität unserer intuitiven Vorstellungen von Punkten und Linien und warf Fragen darüber auf, ob Zeit und Raum kontinuierlich oder diskret sind – Fragen, die auch heute noch in der theoretischen Physik diskutiert werden.

Die Anhänger von Pythagoras (um 556 v. Chr.) lehrten, dass das Universum aus vier Elementen besteht: Erde, Wasser, Luft und Feuer. Nach Platons Timaios, der die pythagoräische Kosmologie darlegte, hatten die Teilchen von Erde, Wasser, Luft und Feuer jeweils die Form eines Würfels, eines Ikosaeders, eines Oktaeders und eines Tetraeders – vier der fünf regulären Polyeder oder sogenannten „platonischen Körper“, die im dreidimensionalen Raum existieren können. Die Lehre von den

vier Elementen wird gewöhnlich Empedokles um 440 v. Chr. zugeschrieben. Aber möglicherweise hat er diese Idee als Schüler von Pythagoras übernommen und sie als seine eigene ausgegeben, nachdem er aus der berühmten pythagoräischen Akademie in Kroton, Italien, ausgeschlossen

worden war, weil er den Eid gebrochen hatte, den die Schüler geleistet hatten, nichts von dem weiterzugeben, was ihnen beigebracht wurde. Die Lehre von den vier Elementen dominierte die Philosophie der alten Griechen, denen der Begriff der chemischen Elemente unbekannt war, und nicht die Atomtheorie. Die Atomtheorie blieb in Europa bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts unentwickelt, als John Dalton eine quantitative Erklärung für die Verhältnisse gab, in denen sich Elemente zu chemischen Verbindungen verbinden, indem er den Atomen der zwanzig Elemente, die er 1808 kannte, relative Gewichte in Bezug auf das Wasserstoffatom zuwies. Im Jahr 1869 schlug Dmitri Mendelejew, Professor für Chemie an der Universität St. Petersburg, sein „Periodensystem“ vor, um die ihm bekannten sechzig Elemente in Spalten nach steigendem Atomgewicht zu gruppieren, wobei Elemente mit denselben chemischen und physikalischen Eigenschaften dieselbe Spalte der Tabelle einnahmen. Es blieben Lücken für Elemente, die existieren sollten, aber noch nicht entdeckt worden waren. So wertvoll diese Tabelle auch für die Vorhersage neuer Elemente wie Germanium und Gallium war, erklärte sie doch nicht, welche Eigenschaften der Atome die beobachtete achtfache Periodizität in der Anordnung von Elementen mit ähnlichen Eigenschaften hervorbrachten. Ihre moderne Version wurde erst mit der Entdeckung des Atomkerns endgültig fertiggestellt.

Nachdem der britische Physiker Sir William Crookes (1832–1919) seine „Crookes-Röhre” erfunden hatte, den Vorläufer der modernen Kathodenstrahlröhre, begannen Wissenschaftler, die von ihrer negativen Elektrode, der Kathode, ausgehenden Strahlen zu untersuchen. Einige glaubten, dass es sich um Wellen handelte, andere gingen davon aus, dass die Strahlen aus Teilchen bestanden. 1895 zeigte Jean Perrin in Paris, dass die Strahlen eine negative Ladung trugen. Dann führte J.J. Thomson (1856-1940) an der Universität Cambridge 1897 eine Reihe von Experimenten durch, die bewiesen, dass Kathodenstrahlen Ströme negativ geladener Teilchen sind. Durch Messung ihrer Bewegung in magnetischen und elektrischen Feldern fand er heraus, dass diese Teilchen etwa zweitausendmal leichter waren als das Wasserstoffatom, das leichteste Atom von allen. Dies war eine Überraschung für Physiker, die glaubten, dass es nichts Leichteres als ein Wasserstoffatom geben könne, da alle Atome unteilbar seien. Dies war die erste Entdeckung eines subatomaren Teilchens – des Elektrons. Thomson wusste bereits, dass Röntgenstrahlen, die 1895 zufällig von Wilhelm Röntgen (1845–1923) entdeckt worden waren, Atome in der Luft dazu bringen konnten, sich positiv oder negativ aufzuladen – sogenannte „Ionen”. Daher begann er, sich positive Ionen als Atome vorzustellen, denen ein oder mehrere Elektronen fehlten. Im Jahr 1903 schlug er ein Atommodell vor, in dem das neutrale Atom aus Elektronen bestand, die wie Pflaumen in einem Pudding in eine positiv geladene Kugel eingebettet waren.

Ernest Rutherford (1871–1937) führte Experimente durch, die dieses Bild widerlegten und zur modernen Sichtweise des Atoms führten. Während seiner Zeit an der McGill Universität in Kanada hatte er entdeckt, dass die von radioaktiven Atomen emittierten Teilchen positiv geladen und viel schwerer als Elektronen sind. Er hatte jedoch festgestellt, dass diese „Alpha-Teilchen” trotz ihrer hohen Geschwindigkeit beim Durchdringen dünner Glimmerplatten gestreut werden konnten. Nicht einmal starke elektrische oder magnetische Felder konnten eine solche Ablenkung bewirken. Im Jahr 1909 streuten Rutherford und Hans Geiger (1882–1945) an der Universität Manchester in England Alphateilchen an einer wenige hundert Atome dicken Goldfolie und stellten zu ihrer Überraschung fest, dass eines von 20.000 dieser Teilchen an seinen Ausgangspunkt zurückprallte. Rutherford beschrieb dies so: „Es war, als hätte man eine 15-Zoll-Geschoss auf ein Stück Seidenpapier abgefeuert, und dieses wäre zurückgeprallt und hätte einen getroffen.“ Im folgenden Jahr berechnete Rutherford, wie nah Alpha-Teilchen an die

positive elektrische Ladung in Atomen herankommen müssen, bevor sie durch die elektrostatische Kraft zwischen ihren Ladungen rückwärts gestreut werden: etwa 10^{-12} cm vom Zentrum des Atoms

entfernt, also ein Zehntausendstel des Radius des Atoms. Das bedeutete, dass die positive Ladung in einem Atom nicht, wie Thomson in seinem Plumpudding-Modell vorgeschlagen hatte, im Atom verteilt war, sondern auf den Mittelpunkt des gesamten Atoms beschränkt war. Ein Atom ähnelte eher dem Sonnensystem, wobei der positiv geladene Kern die Rolle der Sonne übernahm, um die negativ geladene Elektronen wie Planeten kreisten.

Der dänische Physiker Niels Bohr (1885–1962), der Rutherford während seiner Arbeit unter J. J. Thomson in Cambridge kennengelernt hatte, entwickelte diese Idee unter Verwendung neuer Erkenntnisse der Quantenphysik weiter. Das Problem von Rutherfords Modell bestand darin, dass Elektronen, die gemäß den Gesetzen des Elektromagnetismus und der Newtonschen Mechanik um den Kern kreisen, nach diesen Gesetzen kontinuierlich Energie abstrahlen müssten, wodurch sie schließlich in den Kern fallen würden. Bohr löste dieses Problem, indem er 1913 vorschlug, dass sich Elektronen in Atomen in Orbitalen mit festen, nicht variablen Energiemengen bewegten, sodass sie nicht durch kontinuierliche Strahlung allmählich Energie verlieren konnten, sondern diese nur in diskreten, endlichen Mengen oder „Quanten" abgeben konnten. Atomare Elektronen hatten diskrete Energien, weil sie „Schalen" in bestimmten Abständen vom Kern besetzten. Ein Elektron konnte von einer Schale zur anderen „springen". Wenn es Energie absorbierte, sprang es zu einer Schale, die weiter vom Kern entfernt war; wenn es Energie abstrahlte, fiel es zu einer Schale, die näher am Kern lag. Nachdem es zur Schale mit der niedrigsten Energie gefallen war, konnte es keine Energie mehr abgeben und daher nicht weiter in den Kern fallen.

Aber woraus bestanden Atomkerne? Indem sie Alphateilchen durch Wasserstoffgas schossen, entdeckten Rutherford und Ernest Marsden, ein junger Student von Geiger, einfach geladene, positive Teilchen, von denen sie annahmen, dass es sich um Wasserstoffkerne handelte, die durch ihre Kollisionen mit Alphateilchen aus Wasserstoffatomen herausgeschleudert worden waren. Nach mehrjähriger gründlicher Untersuchung der Teilchen, die durch Alphateilchenstrahlen aus den Atomen verschiedener Elemente herausgeschleudert wurden, gab Rutherford ihnen 1919 den Namen „Protonen", abgeleitet vom griechischen Wort für „erster", da sie die ersten identifizierten Bausteine von Atomkernen waren.

Durch sorgfältige Messung der Energie der von verschiedenen Elementen emittierten Röntgenstrahlen fand Henry Moseley (1884–1915), der an Rutherfords Physikabteilung an der Universität Manchester arbeitete, 1913 heraus, dass die positive Ladung jedes Atomkerns ein ganzzahliges Vielfaches der elektrischen Ladung des Elektrons ist. Er entdeckte auch, dass diese positive Ladung um jeweils eine Einheit zunimmt, wenn man sich im Periodensystem von einem Element zum nächsten bewegt. Der Wasserstoffkern hat eine positive Ladung von 1, Helium hat eine positive Ladung von 2, Lithium eine Ladung von 3 und so weiter bis hin zu Uran mit einer Gesamtladung von 92 Einheiten. Moseley hatte die sogenannte „Ordnungszahl" eines Elements entdeckt, den Kernparameter, der die Reihenfolge der Elemente im Periodensystem bestimmt. Da der Wasserstoffkern aus einem Proton besteht, enthält ein Atomkern mit Z Einheiten positiver Ladung Z Protonen, d. h. seine Ordnungszahl ist Z. Moseleys Arbeit bestätigte Bohrs Atomtheorie und das Rutherford-Modell des Atomkerns.

Da das Proton etwa 1840 Mal so viel wiegt wie das Elektron, muss der größte Teil der Masse eines Atoms auf seinen Kern zurückzuführen sein. In den 1920er Jahren gingen Physiker davon aus, dass Kerne doppelt so viele Protonen enthalten wie die außen um sie kreisenden Elektronen und dass sie zusätzlich noch einmal die gleiche Anzahl an Elektronen enthalten, sodass die elektrische Nettoladung des Kerns gleich und entgegengesetzt zur gesamten elektrischen Ladung aller um ihn kreisenden Elektronen ist. Dieses Bild wurde durch das Phänomen des Betazerfalls gestützt, bei dem Elektronen aus dem Kern eines radioaktiven Atoms emittiert werden. Rutherford vermutete

jedoch, dass elektrisch neutrale Teilchen – „Neutronen“ – gemeinsam mit Protonen im Kern vorkommen. Der erste Beweis für seine Annahme kam aus Experimenten, die Walther Bothe und Hans Becker 1930 in Deutschland durchführten. Sie beobachteten die Emission einer sehr durchdringenden neutralen Strahlung, als sie Beryllium mit Alphateilchen beschossen. Sie gingen jedoch davon aus, dass es sich bei dieser Strahlung um Gammastrahlen handelte, ebenso wie Iréne Curie (1897–1956), die Tochter von Marie und Pierre Curie, und ihr Ehemann Frédérick Joliot (1900–1958), als sie diese Arbeit wiederholten. James Chadwick (1891–1974) vom Cavendish Laboratory in Cambridge, England, erkannte die wahre Bedeutung ihrer Ergebnisse, die sie 1932 veröffentlichten: Bei der neutralen Strahlung handelte es sich um Neutronen. Durch Experimente, bei denen die neutralen Strahlen mit verschiedenen Gasen kollidierten, berechnete er, dass die Masse der Teilchen in etwa der Masse des Protons entsprach. Auf diese Weise entdeckte Chadwick das Neutron, den verbleibenden Bestandteil des Atomkerns. Diese Entdeckung veranlasste den großen deutschen Physiker Werner Heisenberg (1901–1976) im selben Jahr zu der Annahme, dass Atomkerne aus Protonen und Neutronen bestehen und nicht, wie bisher angenommen, aus Protonen und Elektronen. Die Anzahl der Neutronen in einem Kern wird als „Neutronenzahl” (N) bezeichnet. Die Summe (Z+N) aus Ordnungszahl und Neutronenzahl ist die Anzahl der Protonen und Neutronen, die in einem Atomkern vorhanden sind. Diese wird als „Massenzahl“ (A) bezeichnet.

Das Neutron ist etwa 0,1 Prozent schwerer als das Proton, unterscheidet sich jedoch, abgesehen davon, dass es keine Ladung hat, kaum vom Proton. Teilchenphysiker betrachten sie heute als die beiden Zustände eines Teilchens, das als „Nukleon” bezeichnet wird. Ein isoliertes Neutron zerfällt im Durchschnitt nach etwa 15 Minuten in ein Proton und ein Elektron. Dies ist die Grundlage der Beta-Radioaktivität. Neutronen in einigen Kernen zerfallen ebenfalls, bleiben in anderen jedoch stabil. Bis vor kurzem glaubten Physiker, dass Protonen stabil sind. Theorien, die subatomare Teilchen und ihre Kräfte vereinen, erfordern den Zerfall des Protons, allerdings erst nach etwa 10^{32} Jahren, was etwa 10^{22} Mal länger ist als das geschätzte Alter des Universums. Zum Zeitpunkt der Abfassung dieses Artikels gibt es keine Experimente, die Hinweise auf instabile Protonen liefern.

Wir werden nicht auf die vielen Modelle des Atomkerns eingehen, die vorgeschlagen wurden, da sie für das Verständnis der von Besant & Leadbeater beschriebenen MPAs nicht direkt relevant sind. In Kapitel 3 werden Beweise und Argumente dafür vorgelegt, dass die MPAs keine Atomkerne sind.

2.2 Das Standardmodell

Betrachten wir einen Kreisel. Die Erfahrungen aus unserer Kindheit zeigen uns, dass er sich mit beliebiger Geschwindigkeit drehen kann, je nachdem, wie stark er in Rotation versetzt wird. Der Grund dafür ist, dass ein rotierender Körper einen „Drehimpuls” hat, der sowohl ein Maß für seine Rotationsgeschwindigkeit als auch für die Verteilung seiner Masse im Raum ist, und die klassische Mechanik erlaubt es, dass der Drehimpuls eines Körpers wie eines Kreisels einen beliebigen Wert aus einem kontinuierlichen Wertebereich annehmen kann. Die menschliche Erfahrung und der gesunde Menschenverstand haben sich jedoch als wenig hilfreich erwiesen, wenn es darum geht, die Eigenschaften von Atomen und subatomaren Teilchen in der Quantenwelt zu beschreiben. Nach der Quantenmechanik kann der intrinsische Drehimpuls oder sogenannte „Spin“ von Quantensystemen nur Werte annehmen, die ganzzahlige Vielfache von ½$\hbar$ sind, wobei $\hbar$ die Plancksche Konstante h geteilt durch 2π ist.

Diese Konstante ist nach dem deutschen Physiker Max Planck (1858–1947) benannt, der im Jahr 1900 erkannte, dass Objekte Energie in Paketen oder „Quanten” abstrahlen, wobei die Energiemenge E durch die Gleichung E = hν mit der Frequenz ν der Strahlung in Zusammenhang steht. Die Grundbausteine der Materie scheinen das zu sein, was Physiker als „Fermionen“ bezeichnen.

Ein Fermion ist ein Teilchen, das sich so verhält, als hätte es einen Spin, der einem ungeraden ganzzahligen Vielfachen (1, 3, 5 usw.) von ½$\hbar$ entspricht. Die Elementarteilchen, die Kräfte vermitteln, werden als „Bosonen“ bezeichnet. Ein Boson hat einen Spin, der ein gerades ganzzahliges Vielfaches (2, 4, 6 usw.) von ½$\hbar$ ist. Der Einfachheit halber ist es üblich, die Einheit $\hbar$ wegzulassen und von einem Teilchen mit dem Spin ½$\hbar$ als „Spin-½“-Teilchen, von einem Teilchen mit dem Spin $\hbar$ als „Spin-1“-Teilchen usw. zu sprechen. Ein Beispiel für ein Fermion ist das Elektron, das einen Spin von ½ hat; ein Beispiel für ein Boson mit Spin 1 ist das Photon, das Paket elektromagnetischer Strahlung, das Albert Einstein 1905 vorhergesagt hat. Diese Strahlung reicht von Gammastrahlen und Röntgenstrahlen am kurzwelligen Ende des elektromagnetischen Spektrums über ultraviolettes, sichtbares und infrarotes Licht bis hin zu Wärme, Mikrowellen und Radiowellen am anderen Ende des Spektrums.

Die Unterscheidung zwischen den beiden Arten von Spin – ganzzahlige und halbzahlige Vielfache von $\hbar$ – hängt daher mit dem Unterschied zwischen Materiefeldern und Kraftfeldern zusammen. Es gibt vier bekannte Arten von Kräften:

1. Die langreichweitige Gravitationskraft. Dies ist eine universelle Kraft, die auf alle Arten von Teilchen wirkt – sowohl auf Fermionen als auch auf Bosonen. Sie wird durch ein masseloses Teilchen mit dem Spin 2 übertragen, das als „Graviton” bezeichnet wird und bislang noch nicht nachgewiesen werden konnte.

2. Die langreichweitige elektromagnetsche Kraft, die nur zwischen elektrisch geladenen Teilchen wirkt. Sie wird durch das masselose Photon übertragen. Sie bindet Elektronen in ihren Bahnen um den positiv geladenen Kern eines Atoms.

3. die kurzreichweitige starke Wechselwirkung, die Protonen und Neutronen im Atomkern zusammenhält. Sie ist über hundertmal stärker als die elektromagnetische Kraft und wird durch Spin-1-Bosonen übertragen, die als „Gluonen“ bezeichnet werden und auf die wir gleich noch näher eingehen werden.

4. die kurzreichweitige schwache Wechselwirkung, die für den Zerfall radioaktiver Kerne verantwortlich ist, indem sie einen Atomkern in einen anderen umwandelt, indem sie Neutronen im Kern in Protonen, Elektronen und Neutrinos umwandelt, sowie für den langsamen Zerfall subatomarer Teilchen. Die Träger der schwachen Wechselwirkung sind die W- und Z-Teilchen, beides Bosonen mit Spin 1, die etwa 90 mal so schwer sind wie Protonen und Neutronen.

Jedes Teilchen, das über die starke Kraft mit anderen Teilchen wechselwirkt, wird als „Hadron“ bezeichnet. Wenn ein Hadron über die schwache Kraft schließlich zu einem Proton zerfällt, wird es als „Baryon“ bezeichnet. Alle Baryonen sind Fermionen. Wenn es schließlich zu einem Teilchen zerfällt, das als Pion bekannt ist, wird es als „Meson“ bezeichnet. Alle Mesonen sind Bosonen. Spin-½-Teilchen, die keine starke Wechselwirkung eingehen, wie beispielsweise das Elektron, werden als „Leptonen“ bezeichnet.

Quarks

Die Verbreitung von Hadronen, die Anfang der 1960er Jahre in Hochenergie-Physiklabors entdeckt wurden, und die Erkenntnis, dass alle damals bekannten Mesonen und Baryonen Familien von Hadronen bildeten (Abb. 2.1), veranlassten den amerikanischen Physiker Murray Gell-Mann und den israelischen Physiker Yuval Ne'eman 1962 dazu, die als „Achtfacher Weg (the Eigthfold Way)”[1] bekannte Klassifizierung von Hadronen zu entwickeln. Diese besteht aus Oktetten von Spin-2-

Baryonen, Spin-0- und Spin-1-Mesonen und einem Decuplet von Spin-3/2-Baryonen, deren Positionen durch die Werte zweier Quantenzahlen namens „Isospin (isospin)" und „Hyperladung (hypercharge)" festgelegt sind, auf deren Bedeutung wir hier nicht näher eingehen müssen. Mit diesem Schema gelang es ihnen, die

Existenz des sogenannten „Omega-Minus"-Teilchens (Ω^- in Abbildung 2.1) vorherzusagen, das 1964 entdeckt wurde.

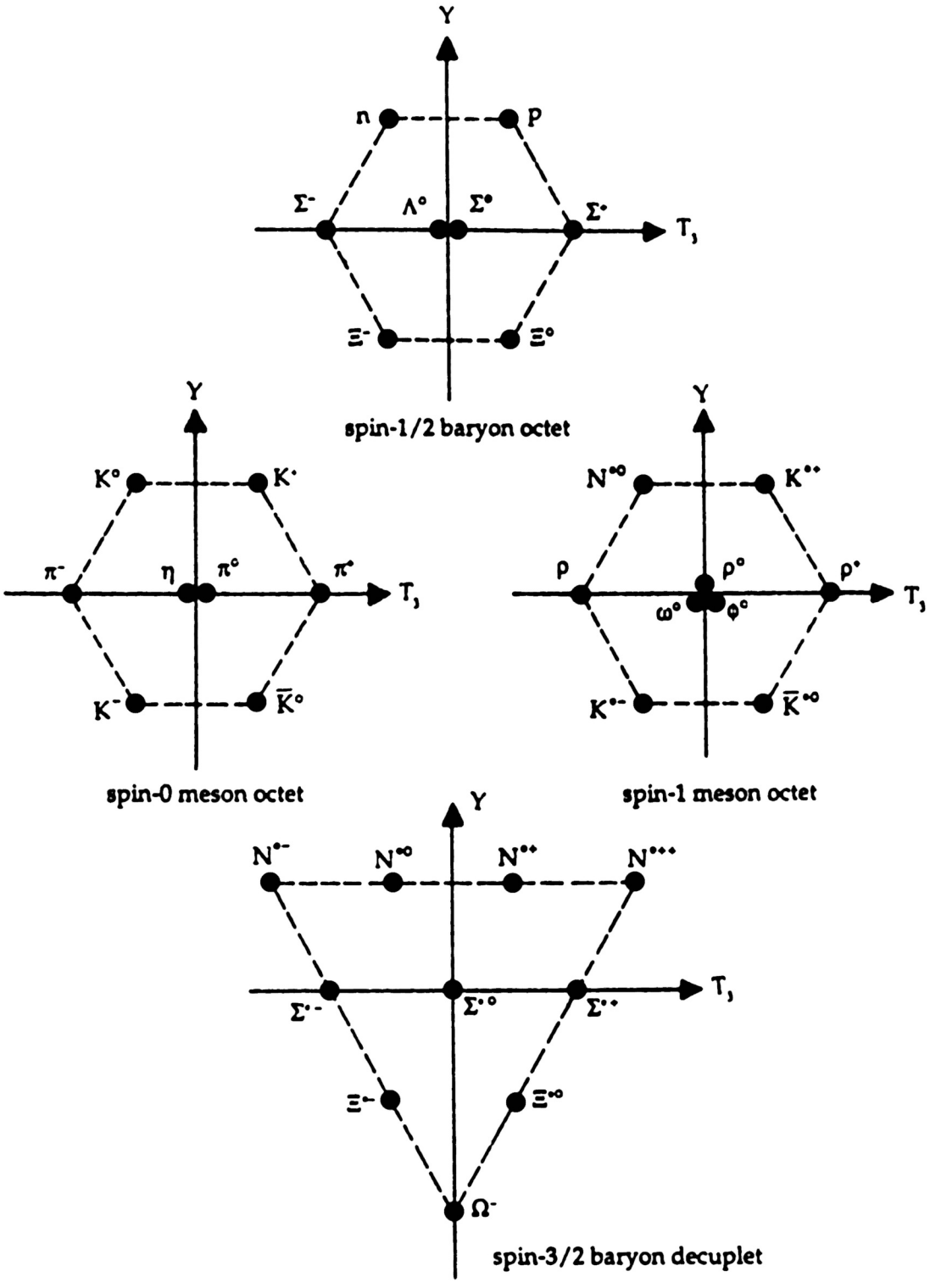


Abbildung 2.1 Die Klassifikation Achtfacher-Weg von Baryonen und Mesonen.

Als Erklärung für diese Muster schlugen Gell-Mann und George Zweig 1964 die Existenz von drei grundlegenden Bausteinen der Materie vor, die als Up-, Down- und Strange-Quarks bezeichnet werden.[2] Dabei handelt es sich um Spin-½-Fermionen, die stark miteinander wechselwirken und entweder gebundene Zustände aus drei Quarks (=Baryonen) oder aus einem Quark und einem Antiquark (sein Antimaterie-Gegenstück) (=Mesonen), bilden. Abbildung 2.2 zeigt die Zusammensetzung des Protons und Neutrons aus Up- und Down-Quarks. Ersteres stellte jedoch ein Problem dar, da Baryonen wie das Omega-Minus in der Gruppe von zehn Baryonen in Abbildung 2.1 aus drei identischen Quarks bestehen mussten. Nach einer Grundregel der Quantentheorie, dem sogenannten „Ausschlussprinzip", können sich jedoch niemals zwei Fermionen im gleichen Quantenzustand befinden. Dieses Problem wurde 1964 von den Physikern Oscar Greenberg, Moo-Young Han und Yoichiro Nambu gelöst, die vorschlugen, dass Quarks drei „Farbladungen" haben, die als „rot", „blau" und „grün" bezeichnet werden. Wenn jedes der drei Quarks, aus denen das Omega-Minus und andere Baryonen mit Spin 3/2 bestehen, eine andere Farbe hat, befinden sie sich in unterschiedlichen Zuständen und das Ausschlussprinzip wird nicht verletzt.

28 ESP of Quarks and Superstrings

Dies führte zur Formulierung der Theorie der Quantenchromodynamik (QCD[3]), die davon ausgeht, dass zwischen den drei Farbzuständen eines Quarks eine „Farbenkraft" wirkt, da jedes Quark drei Arten von Farbladungen besitzt, deren Summe null ist. Diese Ladung wird als eine neue Art von Ladung angesehen, analog zur elektrischen Ladung. Genauso wie elektrische Ladungen positiv oder negativ sein können, kann dies auch bei Farbladungen der Fall sein. Genauso wie sich elektrische Ladungen gleichen Vorzeichens abstoßen und entgegengesetzte Ladungen anziehen, verhält es sich auch mit Farbladungen. Unterschiedliche Farbladungen ziehen sich gegenseitig an, während gleiche Farbladungen sich abstoßen. Beispielsweise ziehen rote Ladungen blaue und grüne Ladungen an, stoßen jedoch rote Ladungen ab. Die Farbladungen von Antiquarks haben das entgegengesetzte Vorzeichen zu denen von Quarks, wobei erstere drei Farben aufweisen, die zu Rot, Blau und Grün komplementär sind. Als gebundene Zustände von Quarks und Antiquarks haben Mesonen daher keine Netto-Farbladung, während in Baryonen die Summe der Farbladungen jedes Quarks in einem anderen Farbzustand ebenfalls Null ist, d. h. Mesonen und Baryonen gelten als „farblos", analog zu den drei Grundfarben des weißen Lichts: Rot, Blau und Grün. Gemäß der QCD können nur farblose Kombinationen von Quarks und Antiquarks existieren.

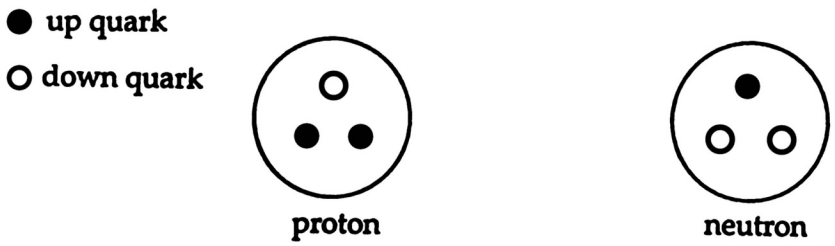


Abbildung 2.2

Die Farbkraft wird durch acht masselose Bosonen mit Spin 1 vermittelt, die als „Gluonen" bezeichnet werden. Sechs davon haben eine Farbladung ungleich Null, wodurch sie stark miteinander wechselwirken können. Dies unterscheidet Gluonen von Photonen, die elektrisch neutral sind und daher nicht elektromagnetisch mit anderen Photonen wechselwirken können. Der Unterschied zeigt sich darin, wie sich die Kraft mit der Entfernung verändert. Elektromagnetische Kräfte variieren umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands zwischen elektrischen Ladungen: Je kürzer der Abstand, desto stärker die Kraft, je größer der Abstand, desto schwächer die Kraft. Die Farbkraft zwischen Quarks wird jedoch schwächer, je näher sie sich sind, und nimmt zu, je weiter sie sich voneinander entfernen. Dies erklärt, warum die Suche nach freien Quarks

bisher erfolglos geblieben ist: Quarks könnten dauerhaft in Hadronen gefangen sein, da die Farbkraft, die sie zusammenhält, umso stärker wird, je weiter sie voneinander entfernt sind. Diese Eigenschaft wurde jedoch noch nicht mathematisch rigoros bewiesen, sodass die Möglichkeit besteht, dass sie bei extrem hohen Energien, die über die derzeit in Teilchenbeschleunigern verfügbaren Energien hinausgehen, freigesetzt werden könnten.

Gell-Manns Quark-Modell benötigte drei Arten von Quarks, um die Achtfach-Klassifizierung von Hadronen zu erklären: das Up-Quark (u) mit einer elektrischen Ladung von 2/3 (wobei die Ladung eines Elektrons als Einheit genommen wird), das Down-Quark (d) mit einer Ladung von -1/3 und das Strange-Quark (s), das ebenfalls eine Ladung von -1/3 hat. Die Schwäche der Theorie bestand darin, dass sie nicht erklärte, warum es drei Arten von Quarks gibt. Die Entdeckung des langlebigen „J/psi-Mesons" im Jahr 1974 deutete darauf hin, dass es ein viertes, sogenanntes Charm-Quark (c) gibt, das die gleiche elektrische Ladung wie das Up-Quark hat. Physiker begannen zu erkennen, dass die Arten von Quarks eine Abfolge von zwei Paaren oder „Generationen" bildeten, die die beiden bekannten Paare von Leptonen widerspiegelten: das Elektron (e^-), das Myon (μ^-) (entdeckt 1937) und die ihnen zugeordneten Neutrinos (ν_e bzw. ν_μ).

Dieses Muster wurde von der elektroschwachen Theorie gefordert, die Abdus Salam, Steven Weinberg und Sheldon Glashow einige Jahre zuvor als Vereinheitlichung der elektromagnetischen und der schwachen Kraft, zwei der vier zuvor aufgeführten bekannten Kräfte, vorgeschlagen hatten. Diese Theorie erfordert die Existenz von vier Spin-1-Bosonen, von denen eines das bekannte Photon ist, der Überträger der elektromagnetischen Kraft. Die drei anderen sind die beiden W-Teilchen, eines positiv und eines negativ geladen, sowie das neutrale Z-Teilchen, die alle die schwache Kraft übertragen und den radioaktiven Zerfall von Kernen bewirken. Das CERN, das Europäische Laboratorium für Teilchenphysik in Genf, Schweiz, gab im Januar 1983 die Entdeckung der beiden W-Teilchen und im folgenden Mai die Entdeckung des Z-Teilchens bekannt.

Die elektroschwache Theorie erfordert außerdem die Existenz eines schweren Bosons mit Spin 0, das als „Higgs-Boson" bezeichnet wird, um mathematisch konsistent zu sein. Man nimmt an, dass dieses bislang unentdeckte Teilchen durch seine Kopplung an Elementarteilchen deren Massen erzeugt. Es vermittelt das Higgs-Feld, das ein Feld konstanter Dichte sein soll, das den gesamten Raum durchdringt, d. h. das Vakuum des Weltraums ist nicht leer, sondern enthält dieses gleichmäßige Feld. [Nachtrag: Im Juli 2012 publizierte das Beschleunigerzentrum CERN den Nachweis eines am Large Hadron Collider erzeugten Teilchens, bei dem es sich um das Higgs-Boson handeln könnte. Diese Vermutung wurde durch weitere Daten bekräftigt und die experimentelle Bestätigung gilt seitdem als gesichert. Das Higgs-Boson oder Higgs-Teilchen ist ein nach dem britischen Physiker Peter W. Higgs benanntes Elementarteilchen aus dem Standardmodell der Elementarteilchenphysik.]

Mit der Entdeckung des Tau-Leptons (τ-) und des zugehörigen Tau-Neutrinos (ν_τ) sowie der Entdeckung des sogenannten „Ypsilon-Mesons" im Jahr 1977 am Fermilab in der Nähe von Chicago, das aus dem sogenannten Bottom-Quark (b) und seinem Antiteilchen besteht, wurde eine dritte Generation von Leptonen und Quarks entdeckt (Tabelle 2.1). Zwei Teams von Physikern, die am Fermilab, dem Teilchenbeschleuniger in der Nähe von Chicago, USA, arbeiteten, gaben im März 1995 bekannt,[4] dass ihre Messungen der Masse des Top-Quarks (t) so gut übereinstimmten, dass sie davon überzeugt waren, das fehlende Mitglied der dritten Generation von Quarks gefunden zu haben.

Tabelle 2.1

	1. Generation	2. Generation	3. Generation
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$
Leptonen	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$

Es scheint keine weiteren Generationen von Leptonen und Quarks zu geben. Im August 1989 gelang es dem Stanford Linear Accelerator Collider an der Universität von Kalifornien in Stanford, die Anzahl der Generationen auf 3,0 ± 0,9 zu begrenzen, wodurch vier Quark-Familien mit einer Zuverlässigkeit von etwa 70 % ausgeschlossen wurden. Im September legte der Large Electron-Positron Collider (LEP) am CERN eine bessere Grenze von 2,7 + 0,7 fest, wodurch vier Generationen mit einer Zuverlässigkeit von 96 % ausgeschlossen wurden.

Die drei Generationen von Quarks und Leptonen, das Photon, die acht Gluonen, die W-, Z- und Higgs-Bosonen bilden das „Standardmodell“ der Teilchenphysik. Einige Physiker haben zusammengesetzte Modelle für Quarks und Leptonen entwickelt, in der Hoffnung, erklären zu können, warum es offenbar nicht mehr als drei Generationen dieser Teilchen gibt, die Anzahl der im Standardmodell verwendeten Parameter (über zwanzig) zu reduzieren und die drei Wechselwirkungen zu vereinheitlichen. Wenn Quarks nicht fundamental sind, sondern aus drei

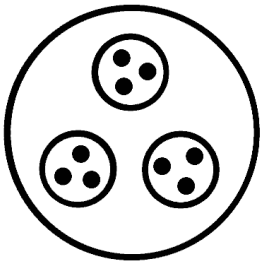


Abbildung 2.3 Subquark-Modell des Baryons

Spin-½-„Subquarks“ bestehen, dann würden Protonen und Neutronen (und Baryonen im Allgemeinen) jeweils aus neun Subquarks bestehen (Abb. 2.3). Bislang gibt es noch keine direkten experimentellen Beweise für diese hypothetischen Grundbausteine der Quarks. Das Ziel dieses Buches ist es jedoch, zweifelsfrei zu beweisen, dass sie existieren!

Physiker versuchen derzeit, die Farbkraft und die elektroschwache Kraft in einem einzigen mathematischen Formelwerk zu vereinen. Solche „großen vereinheitlichten Theorien“ (grand unified theories, GUTs) sagen voraus, dass diese Kräfte bei ausreichend hohen Energien zu einer einzigen Kraft verschmelzen, die zwischen Mitgliedern einer vereinheitlichten Familie von Quarks und Leptonen wirkt. Die mathematische Symmetrie dieser gemeinsamen Kraft bricht dann bei niedrigeren Energien in einer oder mehreren Stufen zusammen, um die bekannten mathematischen Symmetrien der Farbkraft und der elektroschwachen Kraft zu erzeugen. Da die vereinheitlichte Kraft nicht zwischen Hadronen und Leptonen unterscheidet, kann sie bewirken, dass sich Quarks in Leptonen umwandeln. GUTs sagen daher voraus, dass das leichteste Baryon – das Proton – instabil ist und eine Halbwertszeit (die Zeit, die benötigt wird, bis die Hälfte aller Protonen zerfallen ist)

von etwa 10^{32} Jahren hat. Bislang haben noch keine Experimente seltene Zerfälle von Protonen nachgewiesen. Solange dies nicht der Fall ist, können Physiker nicht sicher sein, dass sie die Naturkräfte auf die richtige Weise vereinheitlichen. Jede vereinheitlichte Theorie, die die Gravitation einbezieht, wird als „Theorie von Allem" (TOE) bezeichnet. Eine solche TOE ist die Superstringtheorie, die in Abschnitt 2.5 behandelt wird.

2.3 Das String-Modell

Wenn Metalle auf Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt (etwa -273 °C) abgekühlt werden, verlieren viele ihren elektrischen Widerstand und werden zu perfekten elektrischen Leitern. Wenn dann ein Magnetfeld an ein solches Material im „supraleitenden Zustand" angelegt wird, werden die magnetischen Kraftlinien, die es bei Raumtemperatur und normalem elektrischen Widerstand durchdrungen hätten, fast vollständig aus seinem Inneren verdrängt (Abb. 2.4). Dieser „Meißner-Effekt" wird durch die vollständige Bildung einer großen Anzahl von Elektronenpaaren bei Temperaturen unterhalb eines kritischen Wertes verursacht, die durch ihre gegenseitige Wechselwirkung mit Atomen im Gitter des Materials lose miteinander verbunden sind. Die Bewegung dieser „Cooper-Paare" im externen Magnetfeld

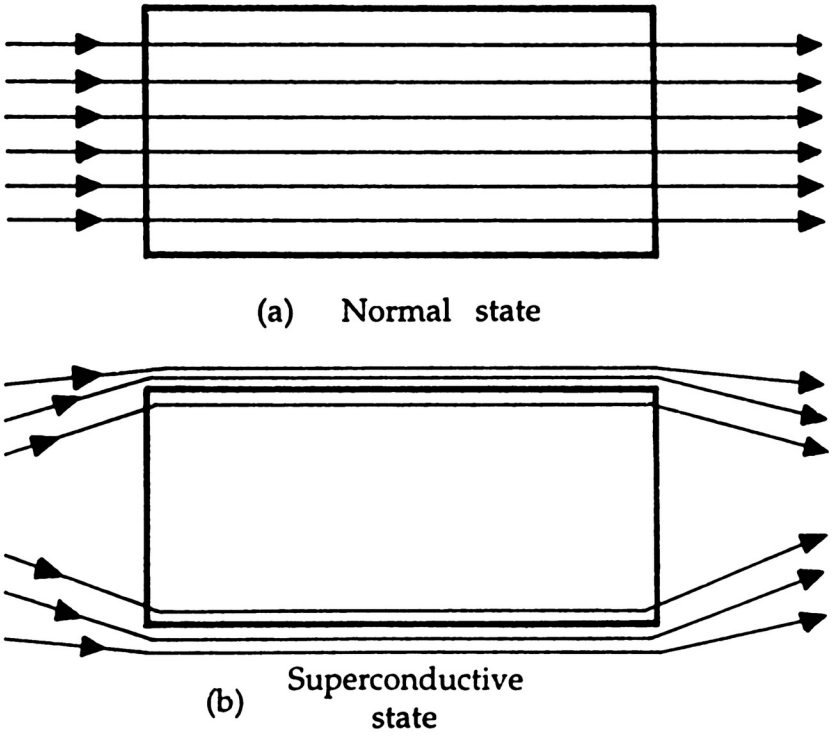


Abbildung 2.4 (a) Normalzustand, (b) Supraleitender Zustand

erzeugt ein lokales Magnetfeld, das dem angelegten Feld überall außer in der Nähe der Materialoberfläche entgegenwirkt und es effektiv aufhebt, was dazu führt, dass der Magnetfluss nur wenig in das Innere des Materials eindringt. Bei Typ-1-Supraleitern wird der Fluss vollständig verdrängt; bei Typ-2-Supraleitern trennen sich die normalen, leitenden Bereiche des Materials in eine Anordnung von Filamenten, die parallel zum äußeren Feld angeordnet und vom verbleibenden supraleitenden Material umgeben sind (Abb. 2.5a). Diese Filamente sind ausgedehnte Bündel von Flusslinien, die durch den Meißner-Effekt aus dem umgebenden supraleitenden Material ausgestoßen wurden und in zylindrischen Wirbeln oder Strudeln aus elektrischem Strom mit variabler Stromdichte gefangen sind, die aus zirkulierenden Elektronen bestehen (Abb. 2.5b). Die Menge des Magnetflusses in einem Wirbel wird in ganzzahligen Vielfachen der Dirac-Einheit des

Flusses $hc/2e = 2 \times 10^{-7}$ Gauss cm^2 quantisiert, wobei h die Plancksche Konstante, c die Lichtgeschwindigkeit und e die elektrische Ladung des Elektrons ist. Der größte Teil des Flusses befindet sich im Kern des „Flussrohrs", erstreckt sich jedoch mit exponentieller Abnahme in den supraleitenden Bereich über eine Entfernung, die durch die „London-Eindringtiefe $\lambda_L = (mc^2/4\pi ne^2)^{1/2}$ gekennzeichnet ist, wobei m die Masse des Elektrons, e seine elektrische Ladung und n die Dichte der supraleitenden Elektronen im Material ist.

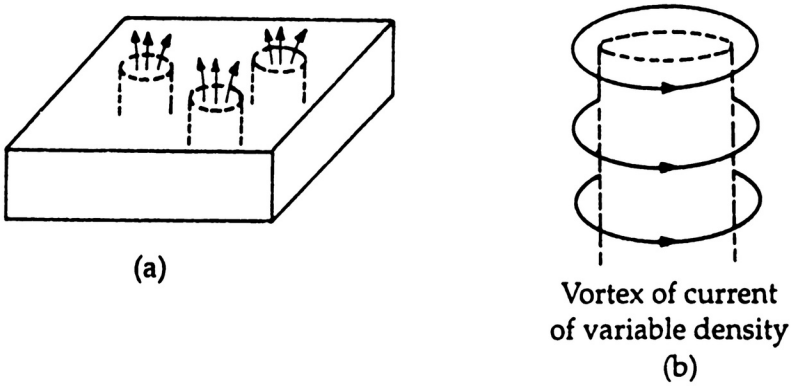
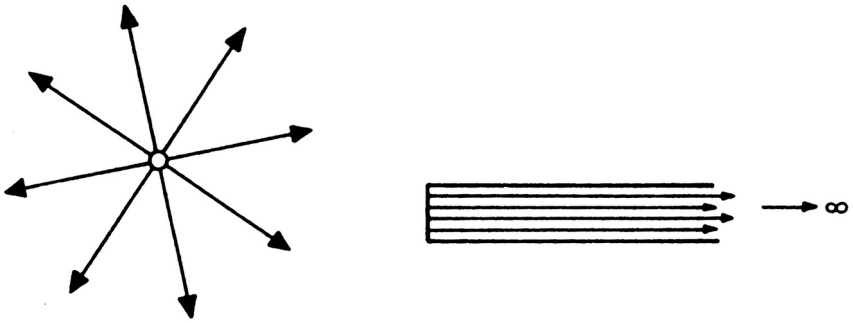


Abbildung 2.5

Die geringe Eindringtiefe eines Magnetfelds in einen Typ-2-Supraleiter ist darauf zurückzuführen, dass masselose Photonen in Supraleitern aufgrund des sogenannten „Higgs-Mechanismus" Masse annehmen, wobei masselose Bosonen, die Kraftfelder übertragen, durch ihre Kopplung an Spin-0-Higgs-Bosonen massiv werden. Nielsen und Olesen wiesen 1973 auf eine bemerkenswerte Parallele zwischen dem Higgs-Modell zur Induzierung des Zusammenbruchs der mathematischen Symmetrie von Kräften und der London-Ginzburg-Theorie der Supraleitung einerseits und den Flusslinien innerhalb von Typ-2-Supraleitern und dem „Dual-String-Modell" der starken Wechselwirkungen andererseits hin. Ihre Arbeit veranlasste Nambu, magnetische Monopole zu untersuchen – hypothetische Teilchen mit einer magnetischen Ladung wie die Nord- und Südpole eines Stabmagneten –, wobei in einem supraleitenden Vakuum das Higgs-Feld die Rolle der supraleitenden Cooper-Paare übernimmt. Er fand heraus, dass Paare von entgegengesetzt geladenen Monopolen dauerhaft miteinander verbunden sind. Da Quarks als magnetische Monopole identifiziert wurden, wären Mesonen Monopol-Antimonopol-Paare, was erklären würde, warum Mesonen nicht in freie Quarks zerfallen können.
Diese Arbeit wurde auf magnetische Monopolquellen von Farbfeldern verallgemeinert. Nach dem String-Modell der Quark-Einschließung [engl. Confinement] wird das Vakuum mit dem Higgs-Feld identifiziert, einem

32 ESP of Quarks and Superstrings

Typ-2-Supraleiter, in den Quarks als Monopole eingebettet sind, die als Quellen der Farbkraft dienen. In einem Vakuum ohne Higgs-Feld divergieren die Flusslinien eines isolierten, positiv geladenen Monopols in alle Richtungen (Abb. 2.6a). Im Higgs-Vakuum werden sie jedoch in einem Bündel innerhalb eines unendlich langen, schmalen Flussrohrs zusammengedrückt (Abb. 2.6b) und durch den Meißner-Effekt aus dem umgebenden, supraleitenden Vakuum ausgestoßen. Ein Flussrohr ist ein Wirbel im



(a) Radiale Flusslinien eines magnetischen Monopoles in einem klassischem Vacuum

(b) Bündel quantisierten Flusses in einem supraleitenden Vakuum

Abbildung 2.6

allgegenwärtigen Higgs-Feld, bestehend aus Strömen von Higgs-Bosonen variabler Dichte, die um den Wirbelkern zirkulieren, in den die meisten Flusslinien zusammengedrückt werden. Ein Monopol ist der Endpunkt dieses Flussrohrs. Flusslinien gehen vom Monopol aus, wenn er positiv geladen ist, und laufen auf ihm zusammen, wenn er negativ geladen ist. Die Higgs-Felddichte ist weit vom Zentrum des Wirbels entfernt konstant, und das Vakuum ist supraleitend (Abb. 2.7). Die Dichte nimmt zur Nähe des Flussrohrs hin ab und fällt in dessen Zentrum auf Null, wo sich das Vakuum in einem normalen Zustand befindet.

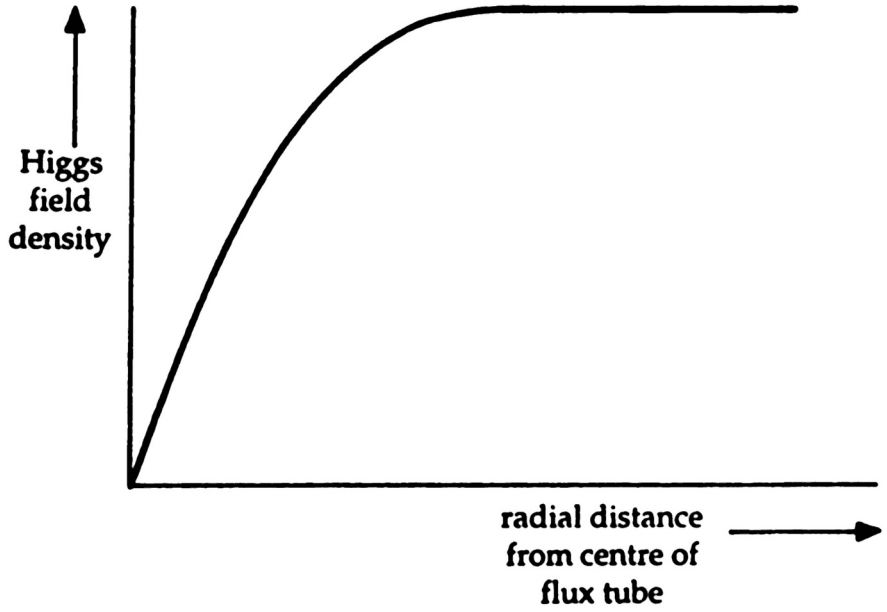


Abbildung 2.7

Als gebundene Zustände eines Quarks und eines Antiquarks werden Mesonen im String-Modell als Flussröhren oder Strings endlicher Länge („offene Strings“) betrachtet (Abb. 2.8a), deren Enden durch ein Bündel von Flusslinien, die vom Monopol (Quark) ausgehen und

am Antimonopol (Antiquark) enden, dauerhaft miteinander verbunden sind. Als gebundene Zustände von drei Quarks werden Baryonen entweder als Y-förmige Strings (Abb. 2.8b) betrachtet, die an Monopolen enden, oder als kreisförmige Strings (Abb. 2.8c), wobei zwei Strings von jedem Monopol ausgehen. Beide Arten von Hadronen sind von einer Wolke virtueller Gluonen umgeben,

die sich über eine Entfernung $\Lambda = h/m_v c$ vom Kern des Flussrohrs erstreckt, wobei h die Plancksche Konstante, m_v die Masse des Gluons, die es durch seine starke Kopplung an das Higgs-Feld erhält, und c die Lichtgeschwindigkeit ist.

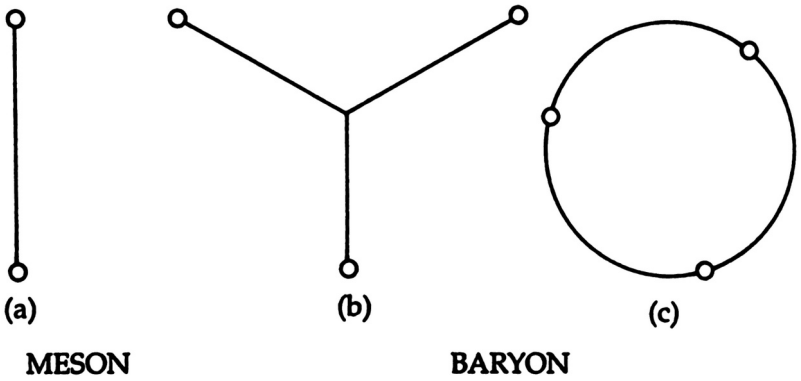


Abbildung 2.8

Die Energie eines Flussrohrs ist proportional zu seiner Länge. Das bedeutet, dass freie Quarks nicht existieren können, da eine unendliche Menge an Energie erforderlich wäre, um das Quark an einem Ende eines Strings vom Antiquark am anderen Ende zu trennen. Wenn ein String gedehnt wird, akkumuliert sich seine potenzielle Energie, bis aus der Energie des Farbfeldes ein neues Quark und ein neues Antiquark entstehen. Das neue Quark verbindet sich dann mit dem Antiquark am anderen Ende des Strings, während das neue Antiquark mit dem ursprünglichen Quark einen neuen geschlossenen String bildet. Tatsächlich zerreißt der String in zwei Teile und bildet zwei Strings, sodass es niemals freie Enden von Strings gibt.

Die Ideen des String-Modells beschränken sich nicht nur auf farbige Quarks. Farbe kann im Zusammenhang mit zusammengesetzten Quark-Modellen zu „Hyperfarbe" verallgemeinert werden, ein Beispiel dafür wurde im Buch ESPQ (S. 23–40) des Autors diskutiert. Die Mikro-Psi-Beobachtungen von Besant & Leadbeater zur Kraft, die UPAs bindet, werden zeigen, dass die Bestandteile von Quarks hyperfarbig sind.

2.4 Superstrings und bosonische Strings

Die folgenden Probleme mit dem String-Modell führten dazu, dass es von den meisten Physikern aufgegeben wurde:

1. Um mit der Quantenmechanik vereinbar zu sein, mussten spinlose oder „bosonische" Strings sechsundzwanzig Dimensionen haben, während spinbehaftete Strings, die Fermionen repräsentierten, nur zehn Dimensionen benötigten. Die Physiker konnten nicht verstehen, wie String-ähnliche Fermionen und Bosonen koexistieren konnten, wenn sie Raum-Zeiten unterschiedlicher Dimensionalität benötigten.

2. String-Modelle von Hadronen enthielten masselose Teilchen mit Spin 1 und ein masseloses Teilchen mit Spin 2, von denen keines bisher entdeckt worden war. Das einzige bekannte Beispiel für Letzteres ist das Graviton. Dieses überträgt jedoch die weitreichende Gravitationskraft. Wie könnte es also in einer Theorie der starken Wechselwirkungen vorkommen? 1974 fanden J. Scherk und J. Schwarz

Hinweise darauf, dass das String-Modell Einsteins Gravitationstheorie als einen besonderen Grenzfall enthielt. Die Theorie sagte jedoch voraus, dass Strings zwanzig Größenordnungen kleiner sein mussten als die typische Größe (10^{-13} cm) von Hadronen und dass ihre angeregten Schwingungsmoden neunzehn Größenordnungen schwerer sein mussten als die typischen Massen der angeregten Zustände von Hadronen.

3. Der Zustand geringster Energie eines Strings war ein „Tachyon“, ein hypothetisches Teilchen, das sich schneller als Licht bewegt. Obwohl Einsteins Spezielle Relativitätstheorie die Existenz von Tachyonen nicht ausschließt, sondern nur verhindert, dass Teilchen, die sich langsamer als Licht bewegen, jemals zu Tachyonen werden können, ist eine relativistische Quantentheorie mit Tachyonen inkonsistent. Daher war das Auftreten von Tachyonen in Stringtheorien für Physiker unerwünscht.

4. Die Quantenchromodynamik [QCD], die konkurrierende Theorie der starken Kräfte, wurde von Physikern bevorzugt.

Superstrings

Einige Physiker wollten jedoch wissen, ob die Einbeziehung der „Supersymmetrie“ einige dieser Probleme lösen könnte. Dabei handelt es sich um eine mathematische Symmetrie, die Fermionen und Bosonen als unterschiedliche Spin-Zustände eines einzigen, fundamentalen, supersymmetrischen Objekts behandelt. Das bedeutet, dass jedes gewöhnliche Fermion einen Superpartner haben sollte, der ein Boson ist, und dass jedes gewöhnliche Boson einen Partner haben sollte, der ein Fermion ist. 1976 zeigten F. Gliozzi, J. Scherk und D.A. Olive, dass Tachyonen in der 1971 von P. Ramond, A. Neveu und J.H. Schwarz entwickelten zehn-dimensionalen Spinning-String-Theorie der Fermionen eliminiert werden könnten, und sie spekulierten, dass das neue Modell supersymmetrisch sein könnte und als Modell sowohl für Fermionen als auch für Bosonen dienen könnte. Aber erst 1980 begannen J. Schwarz und M. Green mit der Entwicklung und Untersuchung der Eigenschaften von Strings, die Supersymmetrie beinhalten – den sogenannten „Superstrings”.[5] Im Jahr 1984 machten sie die überraschende und bedeutende Entdeckung, dass eine in zehndimensionaler Raumzeit formulierte Superstring-Theorie frei von „Quantenanomalien” ist (ein technisches Problem, das Punktfeldtheorien geplagt hatte), vorausgesetzt, dass die vereinheitlichte Superstring-Kraft durch 496 Spin-1-Bosonen übertragen wird. Darüber hinaus verschwinden die Unendlichkeiten, die Berechnungen auf der Grundlage von Punktfeldtheorien erschweren, zumindest auf der ersten Approximationsebene. Diese Vorzüge der Superstring-Theorie führten zu einem erneuten Interesse an Stringtheorien.

Der Superstring ist ein ganz anderes Objekt als die geschlossenen Strings oder Magnetflussröhren, die das frühe String-Modell für Hadronen dargestellt hatte. Da sie von Natur aus super-symmetrisch sind, können Superstrings entweder Bosonen oder Fermionen sein. Verschiedene Harmonische oder Normalmoden der Schwingung des Superstrings entsprechen verschiedenen Teilchen. Seine Spannung, etwa 10^{39} Tonnen, bestimmt die Massenskala. Wenn ihre Größe die sogenannte „Planck-Länge” von 10^{-33}cm ist (die Entfernung von einem schwerkraft-ausübenden Objekt, bei der die Quantennatur des Gravitationsfeldes so wichtig wird, dass die Bedeutung von Entfernung und Zeit, auf denen Einsteins Gravitationstheorie basiert, ungültig wird), haben alle angeregten Schwingungsmoden Massen, die etwa 10^{19} mal so groß sind wie die des Protons oder größer. Eine solche Massenausdehnung übersteigt bei weitem die Energieausbeute, die jeder zukünftige Teilchenbeschleuniger erreichen wird, sodass diese massiven Schwingungsmodi niemals in einem Hochenergiephysiklabor erzeugt und nachgewiesen werden können. Alle beobachteten (und beobachtbaren) subatomaren Teilchen müssen in ihrem niedrigsten Schwingungsenergiezustand Superstrings enthalten. Höhere Schwingungsmoden von Superstrings konnten nur während eines

Zeitraums von bis zu etwa 10^{-43} Sekunden nach dem Urknall angeregt werden, als die Temperatur des Universums

10^{32} Grad Celsius betrug. Bei sämtlichen Energien, die mit aktuellen und geplanten Teilchenbeschleunigern erreichbar sein dürften, sollten sich Superstrings effektiv wie masselose Punktteilchen verhalten.

Es gibt zwei Arten von Superstrings:

1. offene Strings mit freien Endpunkten (Abb. 2.9a): Diese interagieren miteinander, indem sie ihre Enden verbinden, um einen neuen String desselben Typs zu bilden. Sie können sich auch aufteilen, um zwei neue offene Strings zu bilden, oder die beiden Endpunkte eines einzelnen Strings können sich verbinden, um einen einzigen geschlossenen String zu bilden (Abb. 2.9b);

Abbildung 2.9

2. Geschlossene Strings: Diese interagieren, indem sie sich an einem Punkt berühren und zu einem neuen geschlossenen String verbinden.

Lange Zeit glaubte man, dass Superstrings vom Typ 2 keine realistischen Modelle für Elementarteilchen sein könnten, da sie nur gravitativ wechselwirken und keine ladungstragenden Endpunkte mit Ladungen wie elektrischen und Farbladungen aufweisen. Doch 1985 formulierten D.J. Gross, J.A. Harvey, E. Martinec und K. Rohm die Theorie einer neuen Art geschlossener Superstrings, der sogenannten „Heterotischen Superstrings", bei denen die Ladungsquellen der von der Superstring-Theorie vorhergesagten nicht-gravitativen Kräfte als über die gesamte Länge der geschlossenen String verteilt betrachtet werden. Im selben Jahr hatte P.G.O. Freund vorgeschlagen, dass ein Superstring aus der Schrumpfung auf unendlich kleine Skalen von sechzehn der sechsundzwanzig Dimensionen der ursprünglich von der Quantenmechanik für bosonische Strings vorhergesagten Strings resultieren könnte. Wellen können sich in zwei Richtungen um jeden geschlossenen String bewegen. Laut Gross und seinen Kollegen sind die Wellen, die sich in einem geschlossenen heterotischen String im Uhrzeigersinn ausbreiten, jedoch Wellen einer zehn-dimensionalen Superstring-Theorie, während die Wellen, die sich gegen den Uhrzeigersinn ausbreiten, Wellen der sechsundzwanzig-dimensionalen bosonischen Stringtheorie. Anstatt keine Quantenzahlen zu haben, die mit Teilchen assoziiert werden können, weil sie keine Endpunkte hat, wie ursprünglich für geschlossene Strings angenommen wurde, hat der heterotische Superstring mögliche Quantenzahlen, die um seine Länge zirkulieren.

Kompaktifizierung

Die Superstringtheorie sagt voraus, dass die Raumzeit zehn-dimensional ist. Sie erfordert, dass sich sechs der neun räumlichen Dimensionen der Raumzeit über einen unendlich kleinen Maßstab erstrecken, wobei die drei uns bekannten großräumigen Dimensionen des Universums erhalten bleiben. Da die Theorie noch nicht grundlegend formuliert wurde, kann sie die Geometrie und Topologie dieses extrem kleinen, sechs-dimensionalen „kompaktifizierten Raums" noch nicht genau beschreiben. Sie kann nicht einmal die Notwendigkeit vorhersagen, dass sechs und nur sechs

Dimensionen kompaktifiziert werden müssen. Solche Eigenschaften bestimmen, wie sich infolge der Kompaktifizierung oder Aufrollung dieser sechs Dimensionen die ursprüngliche mathematische Symmetrie der Superstring-Kraft in der zehn-dimensionalen Raumzeit in die Symmetrien der starken und elektroschwachen Kräfte auflöst, die in der vier-dimensionalen

Raumzeit beobachtet werden. Da die vereinheitlichte Symmetrie im Vergleich zu letzterer so groß ist, gibt es viele Möglichkeiten, wie sie zusammenbrechen kann. Infolgedessen können viele Arten von kompaktifizierten Räumen mit dem Standardmodell der Teilchenphysik vereinbar sein. Wenn zukünftige Experimente neue Teilchen entdecken, die Änderungen am Standardmodell erfordern, wird diese Unsicherheit bezüglich des kompaktifizierten Raums nur noch größer. Es wurden jedoch Fortschritte dabei erzielt, zu zeigen, dass, wenn die sechs zusätzlichen Dimensionen einen sogenannten „Calabi-Yan“-Raum bilden, die damit verbundene GUT mit dem Standardmodell vereinbar ist. Es gibt jedoch eine Vielzahl solcher Räume, und weitere theoretische Einschränkungen müssen untersucht werden. Ein weiteres Modell, das von Theoretikern in Betracht gezogen wurde, ist der sechs-dimensionale Torus. Dabei handelt es sich um die Verallgemeinerung des Torus (die Form eines Ringdonuts) im sechs-dimensionalen Raum, wobei jede der sechs Dimensionen ein Kreis ist. In diesem Modell wird der Superstring so dargestellt, dass er sich nacheinander um jede kreisförmige Dimension windet (Abb. 2.10), die alle senkrecht zueinander stehen und denselben Radius haben können oder auch nicht. Die Anzahl der Windungen um eine bestimmte kreisförmige Dimension wird als „Windungszahl” bezeichnet. Der sechs-dimensionale Torus wurde zu sogenannten „Orbifolds” verallgemeinert. Dabei handelt es sich um stark gekrümmte Räume mit Löchern und singulären Punkten, die sich durch sie windende Strings einfangen können, indem sie verhindern, dass sie sich entwirren. Solche topologisch gefangenen Strings können die Eigenschaften von Teilchen mit fraktionaler Ladung – Quarks – oder von magnetischen Monopolen aufweisen.
Ihre Topologie kann zu einer Reihe von Teilchengenerationen führen. Ein String, der sich um ein Loch oder eine Singularität windet, kann niemals zu einem String werden, der sich um den kompaktifizierten Raum windet und diesen dabei vermeidet. Das Vorhandensein von Löchern oder Singularitäten in einem Orbifold-Raum hat daher den Effekt, dass seine grundlegende Symmetrie zerstört wird, sodass die vollständige Symmetrie der vereinheitlichten Superstring-Kraft, die in einer flachen, zehn-dimensionalen Raumzeit wirkt, durch den Prozess der Kompaktifizierung in einen winzigen sechs-dimensionalen Orbifold-Raum gebrochen werden kann, was zu den Kräften und Teilchen führt, die durch das Standardmodell beschrieben werden. Zumindest hoffen dies die Stringtheoretiker. Die in den Kapiteln 3 und 4 dieses Buches vorgestellten Mikro-Psi-Beweise deuten darauf hin, dass die Befürworter der Superstring-Theorie überrascht sein werden!

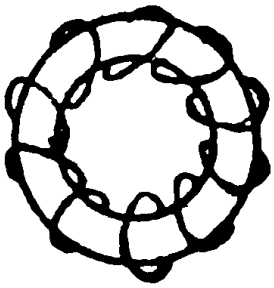


Abbildung 2.10

Referenzen

1. M. Gell-Mann and Y. Ne’eman, The Eightfold Way (W.A. Benjamin, Inc., New York, 1964).

2. Non-technical introductions to the quark model are given in the Bibliography.

3. See Bibliography for elementary expositions of QCD.

4. ‘The top quark found at long last,’ by John Maddox, Nature, vol. 374 (9 March, 1995), p. 113;

   ‘Chicago quark hunters come out on top,’ by Vincent Kiernan, New Scientist (19 March, 1995), p. 6.

5. See Bibliography for non-mathematical introductions to superstring theory.